

DEEL V

Gelijkstroommotor

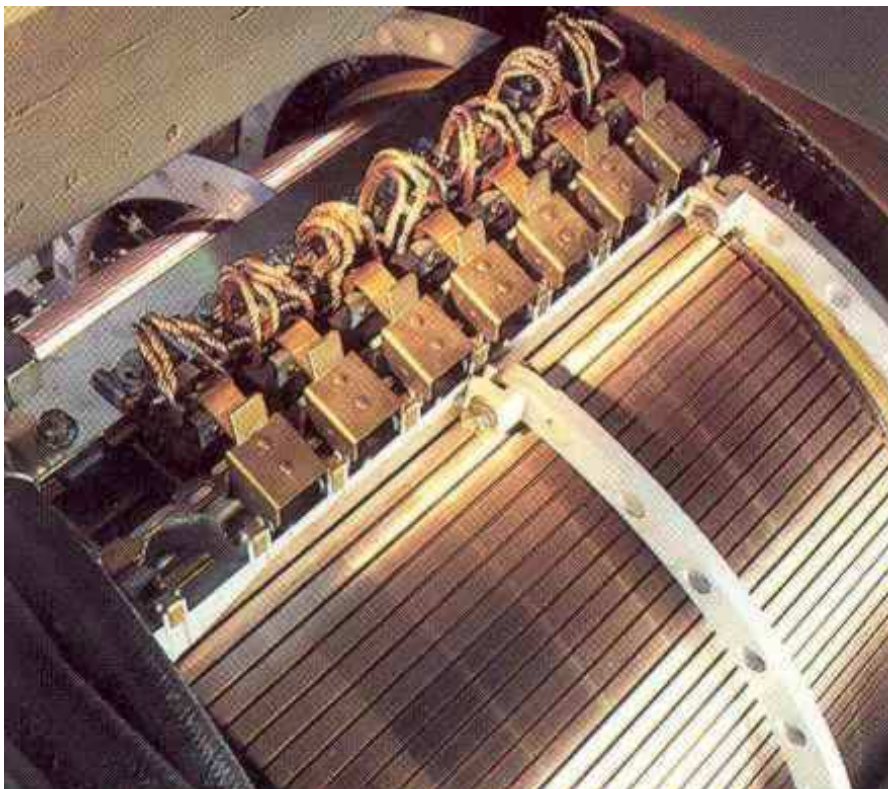


Foto ABB

HOOFDSTUK 1

BASISBEGRIPPEN

1.1 Motormodel

Bij roterende elektrische machines bestaat de magnetische keten gedeeltelijk uit ferromagnetisch materiaal, gedeeltelijk uit een luchtspleet. Het magnetisch materiaal leidt de flux in een gewenste baan. De luchtspleet is magnetisch gezien een noodzakelijk kwaad, waarin de elektromagnetische interacties plaatsgrijpen en waardoor relatieve bewegingen mogelijk worden. Algemeen kan men stellen dat een magnetische flux opgewekt wordt door een elektrische stroom, expliciet in het geval van een elektromagneet, impliciet in het geval van een permanente magneet. Beschouw een geleider die een stroom i voert. In magnetische termen kan dit beschouwd worden als een magneto-motorische kracht (m.m.k.) of een doorstroming Θ . Indien Θ gegenereerd wordt door een spoel met N windingen, geldt $\Theta = Ni$.

De flux ϕ volgt uit de doorstroming:

$$i \rightarrow \Theta \rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{B} \rightarrow \phi \quad (1.1)$$

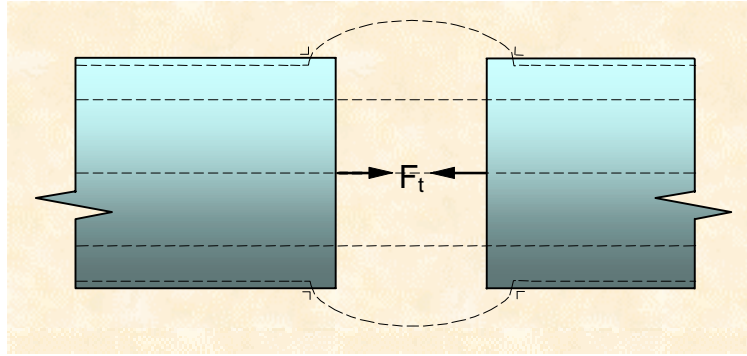
Het verband tussen de flux ϕ en de oorzakelijke doorstroming $\Theta = Ni$ wordt gegeven door de wet van Hopkinson:

$$\phi = \frac{\Theta}{\mathfrak{R}_m} = \Theta \Lambda = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_m} = Ni\Lambda \quad (1.2)$$

waarin \mathfrak{R}_m de magnetische reluctantie voorstelt en Λ de magnetische permeantie.

Het is vaak toegelaten de magnetische weerstand van het ferromagnetisch materiaal te verwaarlozen, wat neerkomt op een relatieve permeabiliteit voor het ijzer gelijk aan oneindig. Er wordt verondersteld dat er enkel in de luchtspleet magnetische energie opgestapeld is en dat er geen m.m.k. nodig is om de flux door het ijzer te krijgen. In de luchtspleet is slechts de resulterende flux aanwezig. Hij kan wel samengesteld gedacht worden uit de superpositie van afzonderlijke componenten van de magnetische inducties, die op hun beurt geproduceerd worden door individuele stromen en/of permanente magneten.

James C. Maxwell formuleerde het verschijnsel van de magnetische krachtwerking op een alternatieve wijze als deze die in de analyse van elektrische machines normalerwijze gebruikt wordt (Lorenz kracht: $B \ell i$ -regel). In figuur 1.1 zijn twee polen van een magnetische keten voorgesteld met het fluxverloop in streeplijnen.



figuur 1.1 *Maxwellse trekspanningen*

Volgens Maxwell bestaat tussen deze beide polen een "Maxwellse trekkraft" F_t gericht volgens de fluxlijnen. De Maxwellse trekspanning (kracht per eenheidsoppervlak) is:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{S} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.3)$$

Deze Maxwellse benadering is in de machinetheorie van zeer groot belang voor de analyse van parasitaire fenomenen. Zij wordt voor berekeningen van het normale koppel weinig toegepast.

1.2 Werkingsprincipe

De werking van de gelijkstroommachine kan worden uitgelegd in termen van enkele basisprincipes van het elektromagnetisme:

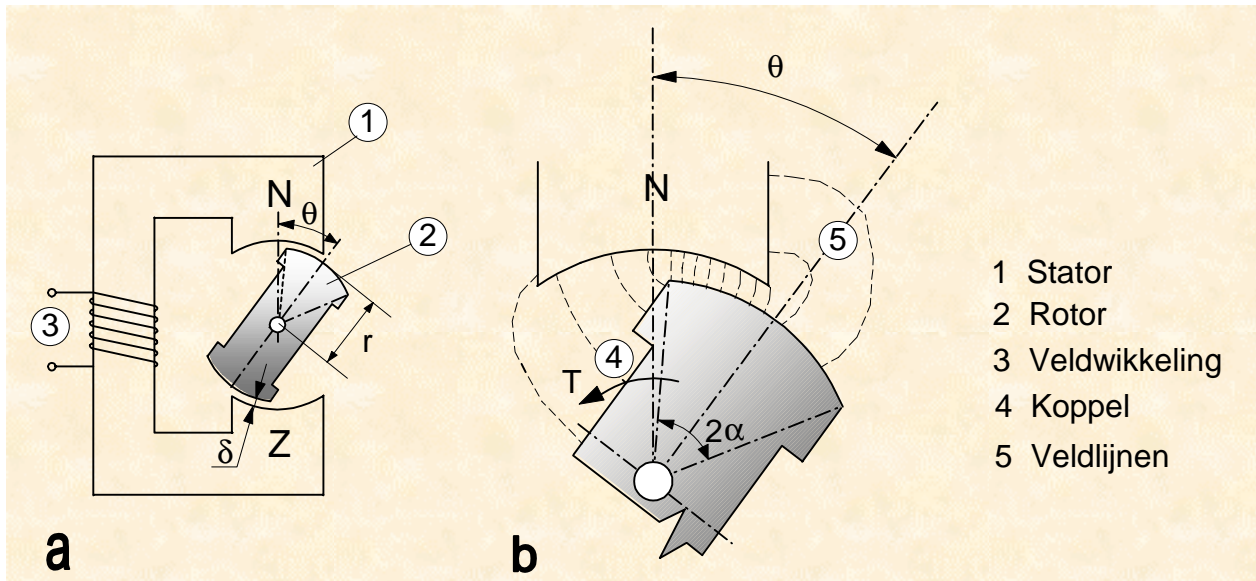
- magnetisch opgewekte krachten (reluctantiekracht en interactiekracht);
- spanningsinductie E_r (e.m.k.) door fluxverandering $\frac{d\phi}{dt}$.

1.2.1 Reluctantiekracht (aligneerkracht)

Een zeer elementaire, roterende machine (figuur 1.2a) bestaat uit een vast opgestelde "stator", geconstrueerd uit ferromagnetisch materiaal, die bekrachtigd wordt door een stroom in de veldwikkeling. Deze stroom produceert een flux in de magnetische keten. Het bewegende deel van de machine vormt een ferromagnetische "rotor" (niet bekrachtigd) tussen de noord- en de zuidpool van de stator. Het verloop van de fluxlijnen tussen stator en rotor is op figuur 1.2b gegeven. Enkel de bovenste luchtspleet is getekend. In de kleine luchtspleet met lengte δ is de magnetische inductie \vec{B} radiaal gericht. Volgens het concept der Maxwellse trekkraften resulteert dit in een radiale aantrekking tussen rotor en stator.

In de aanliggende gebieden van de luchtspleet verloopt de flux van de stator naar de rotor aan de noordpoolzijde bekeken. Aan de zuidpool verlopen de fluxlijnen andersom. Hier treedt een Maxwellse trekkraft op die de rotor in tegenuurwijzerzin doet draaien om de rotor met de

stator te aligneren. De oppervlakte van de kleine luchtspleet neemt toe en de magnetische reluctantie neemt af.



figuur 1.2 *Werking van een elementaire elektrische motor - aligneerkracht*

Het ontwikkelde koppel kan eenvoudig worden afgeleid. Als θ klein is, mag verondersteld worden dat de magnetische energie hoofdzakelijk aanwezig is in de luchtspleet. De energiedichtheid wordt gegeven door:

$$w_{\text{magn}} = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.4)$$

De flux door de elementaire machine wordt constant ondersteld wat voor kleine verplaatsingen aanvaardbaar is. De rotor heeft een axiale lengte ℓ , zodat het luchtspleetvolume gegeven wordt door:

$$V = \ell \delta r (2\alpha - \theta) \quad (1.5)$$

Omdat er een luchtspleet δ is aan noord- en zuidpool, moet het volume van (1.5) verdubbeld worden. De magnetische energie in het totale luchtspleetvolume is:

$$W = \frac{B^2}{\mu_0} \ell \delta r (2\alpha - \theta) \quad (1.6)$$

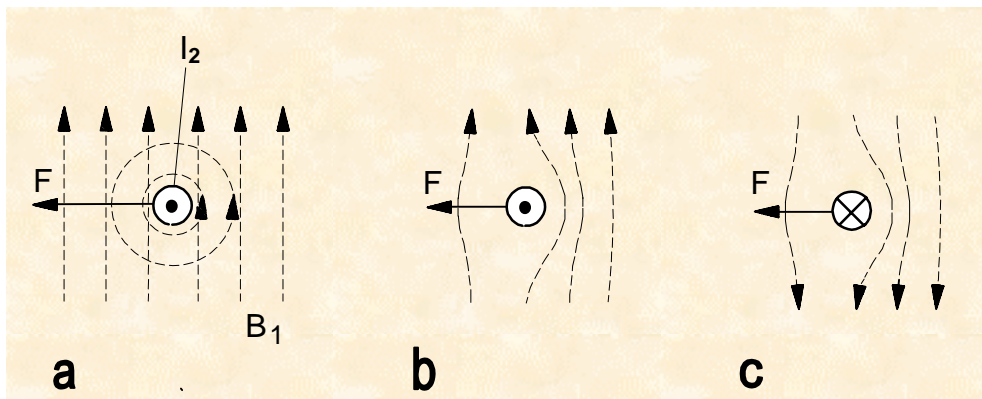
Een elementaire toename $d\theta$ van de hoek tussen de magnetische assen van stator en rotor geeft aanleiding tot een verandering van de opgeslagen magnetische energie en vereist een zekere mechanische arbeid $Td\theta$ (stelling van de virtuele arbeid). Gelijktelling van de door een uitwendige aandrijving geleverde mechanische arbeid aan verandering van magnetische energie levert het koppel:

$$T = \left| \frac{dW}{d\theta} \right| = \frac{B^2 \ell \delta r}{\mu_0} \quad (1.7)$$

1.2.2 Interactiekracht

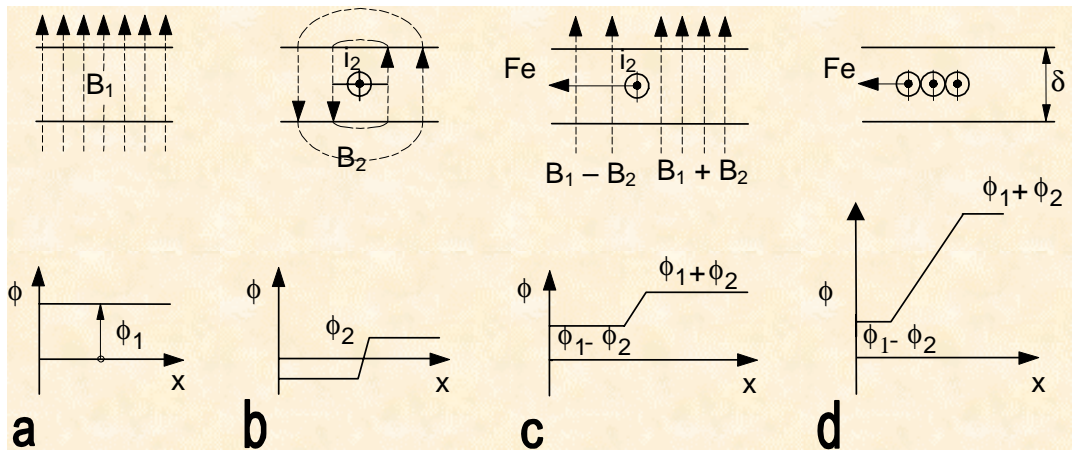
In figuur 1.3b voert een geleider met lengte ℓ een stroom i_2 . Hij staat loodrecht op een magnetisch veld met inductie \vec{B}_1 . De geleider ondervindt een kracht naar links, loodrecht op de geleider en op \vec{B}_1 . De grootte van de kracht is (B*l*-regel):

$$F = B_1 \ell i_2 \quad (1.8)$$



figuur 1.3 *Krachtwerking op een geleider in een magnetisch veld*

In figuur 1.3a is \vec{B}_1 een homogeen magnetisch veld, veroorzaakt door een wikkeling of een permanente magneet. De stroom i_2 brengt zelf een magnetische inductie \vec{B}_2 voort die in de figuur is voorgesteld door de cirkelvormige, gestreepte lijnen. De resulterende magnetische inductie is voorgesteld in figuur 1.3b. Figuur 1.5c toont aan dat de richting van de interactiekracht \vec{F} dezelfde blijft, als men de oorspronkelijke magnetische inductie \vec{B}_1 en de stroom i_2 van richting omkeert. Dit effect wordt gecreëerd in een motor. Het veld \vec{B}_1 wordt verwezenlijkt in de luchtspleet tussen de polen van een elektromagneet of een permanente magneet en de stroom i_2 wordt opgelegd door een uitwendige bron. In figuur 1.6 is de luchtspleet met lengte δ en diepte ℓ ontwikkeld in het vlak.



figuur 1.4 *Veldverdeling in de luchtspleet*

De magnetische inductie \vec{B}_1 en de flux ϕ_1 (homogeen en constant) kunnen gegenereerd worden door een doorstroming Θ_1 of door een permanente magneet (figuur 1.4a). Voor de grootte geldt:

$$B_1 = \mu_0 H = \mu_0 \frac{\Theta_1}{2\delta} \quad (1.9)$$

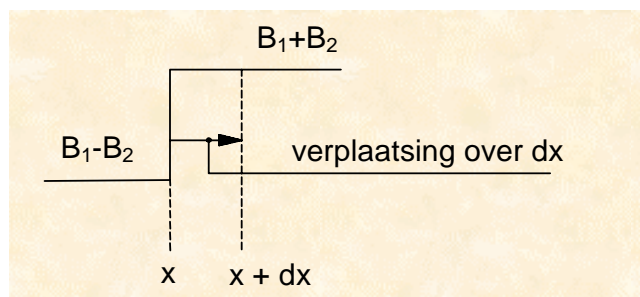
Indien de veldspool, die \vec{B}_1 veroorzaakt, onbekrachtigd is en er een stroom i_2 gestuurd wordt door een geleider in de luchtspleet (figuur 1.4b), ontstaat een doorstroming $\Theta_2 = i_2$, die op haar beurt aanleiding geeft tot een flux die tweemaal de luchtspleet oversteekt:

$$H_2 2\delta = i_2 \quad (1.10)$$

en

$$B_2 = \frac{i_2 \mu_0}{2\delta} \quad (1.11)$$

De twee toestanden worden gesuperponeerd. De resulterende luchtspleetflux wordt asymmetrisch (figuur 1.4c). De kracht \vec{F} vindt men uit de verandering van luchtspleet-energie die ontstaat door de geleider over een elementaire afstand dx te verplaatsen (figuur 1.5).



figuur 1.5 *Wet van de virtuele arbeid voor de krachtberekening*

Beschouw het elementaire luchtspleetvolume begrepen tussen x en $x + dx$:

$$dV = \ell \delta dx \quad (1.12)$$

Voor de verplaatsing is de energiedichtheid:

$$\frac{(B_1 - B_2)^2}{2\mu_0}$$

en na de verplaatsing:

$$\frac{(B_1 + B_2)^2}{2\mu_0}$$

Het energieverschil in het elementaire volume dV is:

$$dW = \frac{1}{2} [(B_1 + B_2)^2 - (B_1 - B_2)^2] \frac{\ell \delta dx}{\mu_0} = \frac{2}{\mu_0} B_1 B_2 \ell \delta dx \quad (1.13)$$

Met (1.11) wordt dit:

$$dW = B_1 i_2 \ell dx \quad (1.14)$$

zodat:

$$F = \frac{dW}{dx} = B_1 i_2 \ell \quad (1.15)$$

wat identiek is aan (1.8). De krachtwerking wordt bekomen uit het ongestoorde veld B_1 en de erin gedompelde stroom i_2 . Een bundel van N geleiders, die elk een stroom i_2 voeren, heeft een fluxverdeling, zoals in figuur 1.4d weergegeven. In dit geval is de flux ϕ_2 rechts van de geleiders:

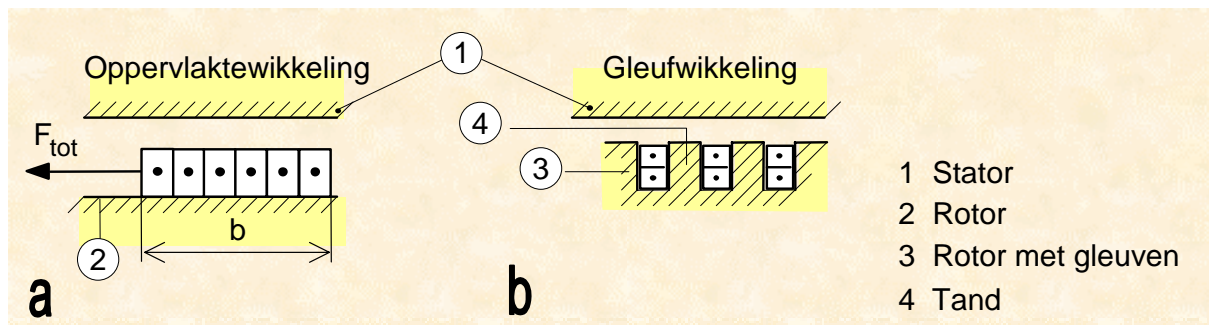
$$\phi_2 = \frac{N i_2}{\mathfrak{R}_m} \quad (1.16)$$

en de totale kracht op de N geleiders is (1.8):

$$F = B_1 \ell N i_2 \quad (1.17)$$

alsof iedere geleider, onafhankelijk van de andere, een bijdrage tot de kracht levert.

Om deze krachtwerking te gebruiken in een machine is het noodzakelijk de stroomvoerende geleiders te bevestigen aan het beweegbare deel van de machine, de rotor. In figuur 1.6a stelt het onderste gedeelte de rotor voor, het bovenste de stator, en heeft men de geleiders bevestigd als een oppervlaktewikkeling.

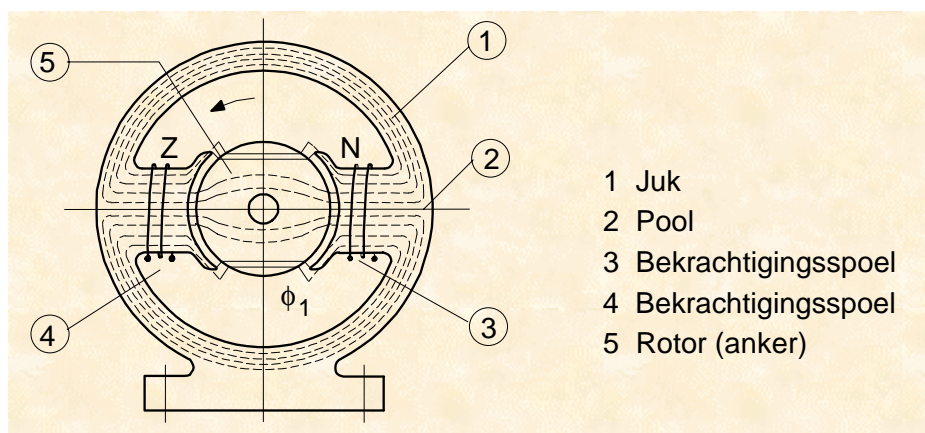


figuur 1.6 *Overgang van oppervlaktewikkeling naar gleufwikkeling*

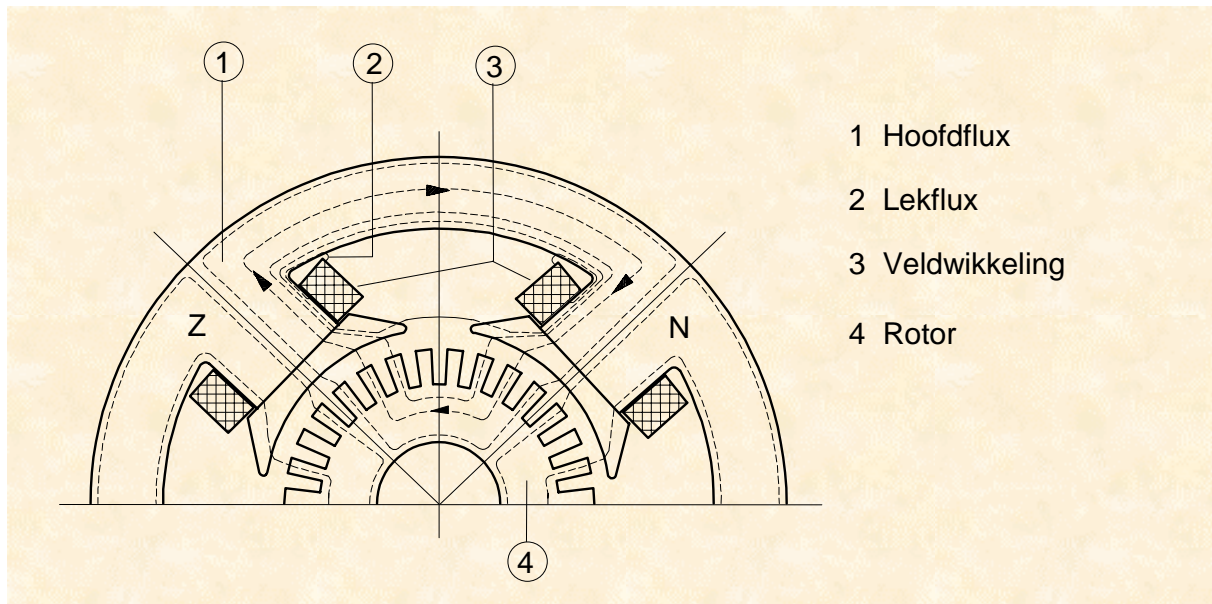
Als de geleiders grote stromen voeren, zijn de krachten echter zo groot dat het moeilijk wordt een stevige bevestigingsmethode te vinden die weerstaat aan de grote schuifkracht in het geleider-rotor scheidingsoppervlak. Daarom plaatst men de geleiders in gleuven (figuur 1.6b). Dit heeft voornamelijk twee voordelen:

- de kracht wordt nu bijna volledig overgedragen op de gleufwanden en wordt opgenomen door de sterke ijzeren tanden;
- de lengte van de luchtspleet wordt verkleind, zodat de magnetiseringsstroom voor de flux ϕ_1 gereduceerd wordt.

Het fluxpatroon blijft ongeveer hetzelfde, zodat het krachtenpatroon ook hetzelfde is. De krachten grijpen nu aan op het ijzer, daar de geleiders zelf geen flux meer voeren en dus krachtvrij zijn. figuur 1.7 stelt een tweepolige machine voor. Spoelen 3 en 4 vormen de bekrachtigingsspoelen of veldwikkelingen en produceren de inductie B_1 en flux ϕ_1 . Deze ongestoorde flux ϕ_1 zoekt zijn weg doorheen de magnetische keten en steekt tweemaal de luchtspleet over via de rotor. De rotorleiders, die de stroom i_2 voeren, zijn niet voorgesteld. figuur 1.8 toont de bovenste helft van een vierpolige machine.

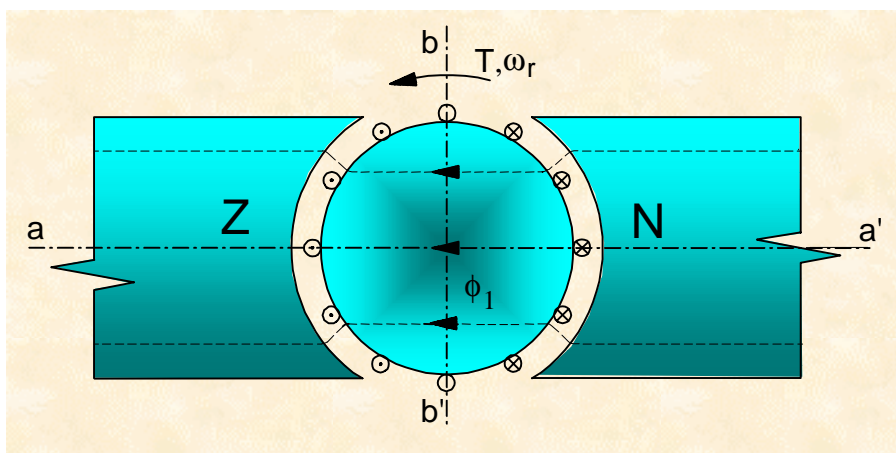


figuur 1.7 *Tweepolige gelijkstroommotor*



figuur 1.8 *Bovenste helft van een vierpolige gelijkstroommotor*

figuur 1.9 illustreert op elementaire wijze de krachtwerking. De rotorgeleiders zijn voor de eenvoud niet in gleuven getekend.

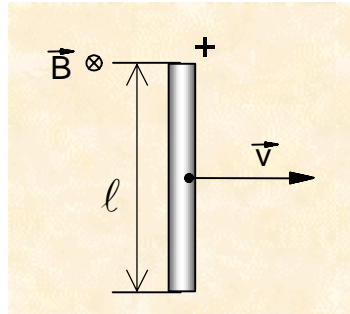


figuur 1.9 *Fundamentele krachtwerking*

Links van de lijn bb' komt de stroom uit het blad, terwijl de geleiders rechts van bb' een naar achter gerichte stroom voeren. De geleiders op bb' zijn stroomloos. Hoe dit stroompatroon ontstaat, wordt verder besproken (commutatie). Hier is het enkel noodzakelijk in te zien dat een dergelijke stroomverdeling eenduidig aanleiding geeft tot de aangeduide kracht- en draairichting (T en ω_r tegenuurwijzerzin gericht). De oppervlaktewikkeling van figuur 1.9 bestaat uit $2N$ geleiders waarvan er N een stroom i voeren (links van bb') en de andere N een stroom $-i$. Er is geen stroom in de geleiders op de lijn bb' . Als N toeneemt en dus de geleiders dichter bij elkaar komen (de stroom i neemt af, zodat Ni constant blijft), wordt dit in de limiet hetzelfde als een dunne bandgeleider, die een totale stroom Ni (respectievelijk $-Ni$) voert. De totale stroom wordt als het ware uitgesmeerd over de rotoromtrek.

1.2.3 Geïnduceerde spanning (e.m.k.)

Beschouw een geleider met lengte ℓ die met een snelheid \vec{v} beweegt, loodrecht op een constante magnetische inductie \vec{B} (figuur 1.10).



figuur 1.10 *Bewegende geleider in een magnetisch veld*

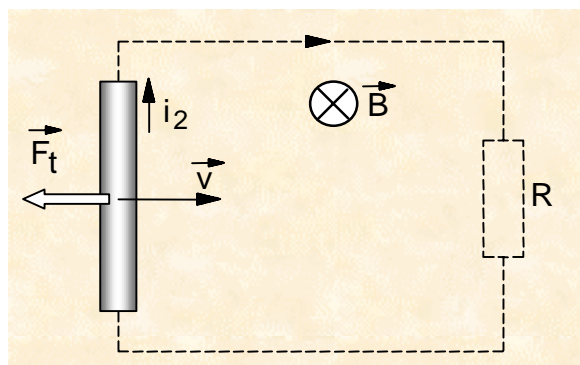
Tengevolge van deze beweging ontstaat er in de geleider een geïnduceerde spanning overeenkomstig de inductiewet van Faraday-Lenz:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.18)$$

wat in dit geval wordt:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -B\ell v = e_r \quad (1.19)$$

Dit is de $B\ell v$ -regel. Het teken van e_r is zodanig dat de stroom die ze voortbrengt in een gesloten keten de ontstaansoorzaak tegenwerkt. In dit geval zou de stroom in de geleider van beneden naar boven vloeien (figuur 1.11) en aanleiding geven tot een tegenwerkende kracht \vec{F}_t op de geleider. \vec{F}_t werkt de ontstaansoorzaak van e_r , namelijk de beweging met snelheid \vec{v} , tegen. Dit is generatorwerking.



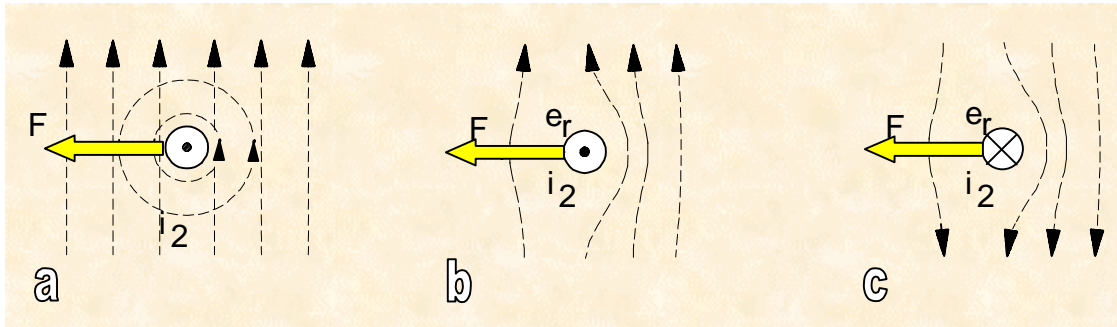
figuur 1.11 *Kracht gegenereerd door een geïnduceerde stroom*

Beschouw motorwerking, dan wordt een stroom i_2 uitwendig opgelegd. Er ontstaat een kracht \vec{F} (figuur 1.12). De machine draait met hoeksnelheid ω_r zodat het systeem mechanisch vermogen levert:

$$P_m = Fv = B_1 \ell i_2 v \quad (1.20)$$

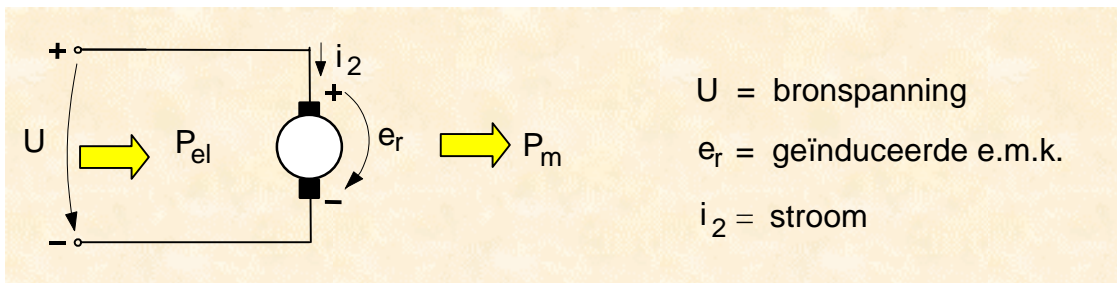
of

$$P_m = B_1 \ell v i_2 = e_r i_2 \quad (1.21)$$



figuur 1.12 *Opgedrukte stroom en resulterende beweging met geïnduceerde spanning*

In (1.19) is e_r de geïnduceerde spanning in de geleider. Het laatste lid is niets anders dan het inwendig elektrisch vermogen, dat moet toegevoerd worden, opdat het systeem mechanisch vermogen zou kunnen leveren. De vermogenstroom wordt in figuur 1.13 gegeven. Elektrisch vermogen wordt omgezet in mechanisch. Men zegt dat het systeem als motor werkt.



figuur 1.13 *Vermogenstroom in motorwerking*

Aan de fictieve gelijkspanningsbron e_r wordt een elektrisch vermogen:

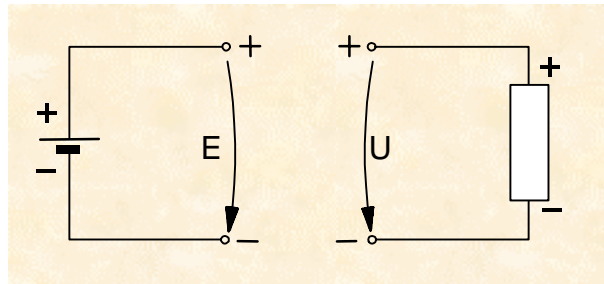
$$P_{el} = e_r i_2 \quad (1.22)$$

geleverd.

Uit (1.21) en (1.22) volgt:

$$P_m = P_{el} \quad (1.23)$$

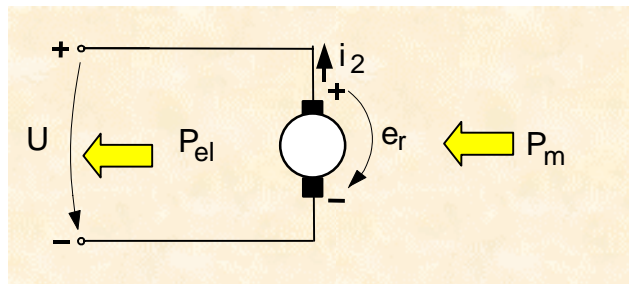
wat de essentie is van de elektromechanische energieomzetting.



figuur 1.14 Conventionele spanningsrichtingen

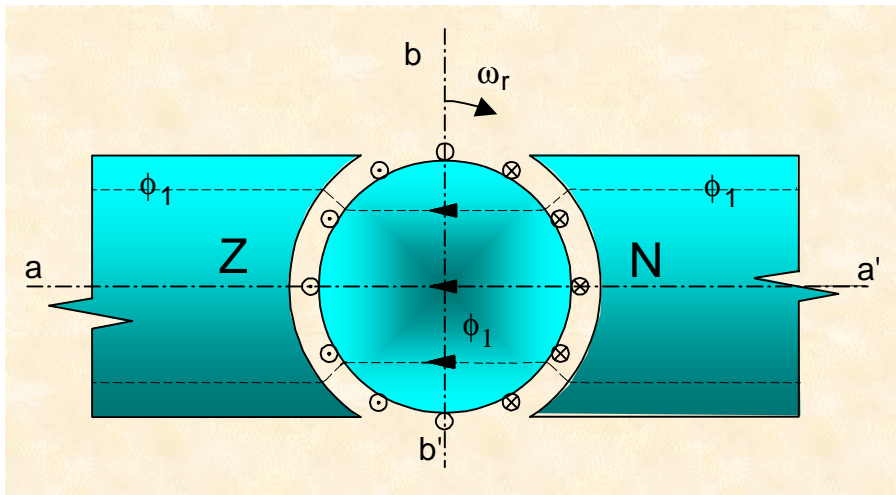
Volgens conventie wordt de spanning aangeduid door een pijl van + naar - (figuur 1.14). In figuur 1.13 kunnen spanning en stroom door eenzelfde pijlrichting voorgesteld worden. In figuur 1.12a en figuur 1.12b stelt \odot de stroom- en spanningspijl voor.

Als de opstelling van figuur 1.12 daarentegen in de generatormode werkt, m.a.w. als de geleider onder invloed van een uitwendig aangelegde kracht met een snelheid v beweegt, wordt mechanisch vermogen P_m toegevoerd. De machine ontwikkelt dezelfde e_r , met dezelfde richting als in figuur 1.12a. De stroom i_2 wordt niet uitwendig opgelegd, maar vloeit ten gevolge van de spanning e_r . De stroom i_2 in generatormode is tegengesteld aan deze van figuur 1.12. In dit geval levert het systeem elektrisch vermogen (figuur 1.15). Zij werkt als generator.



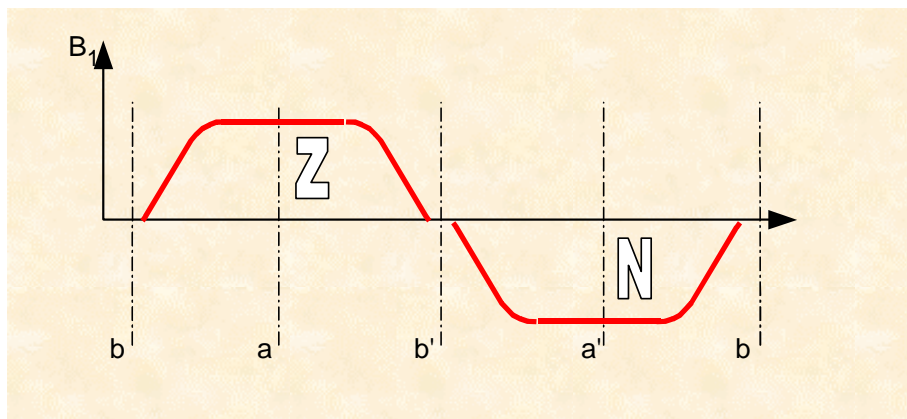
figuur 1.15 Vermogenstroom in generatorwerking

Om de spanningsopwekking te verduidelijken wordt de generatorwerking van een gelijkstroommachine nader toegelicht. Om de uiteenzetting eenvoudig te houden, beschouwt men een tweepolige machine (figuur 1.16).



figuur 1.16 *Spanningsrichting in generatorwerking*

De verdeling van de radiale componente van het luchtspleetveld langsheen de rotoromtrek heeft een bijna blokvormig verloop (figuur 1.17).



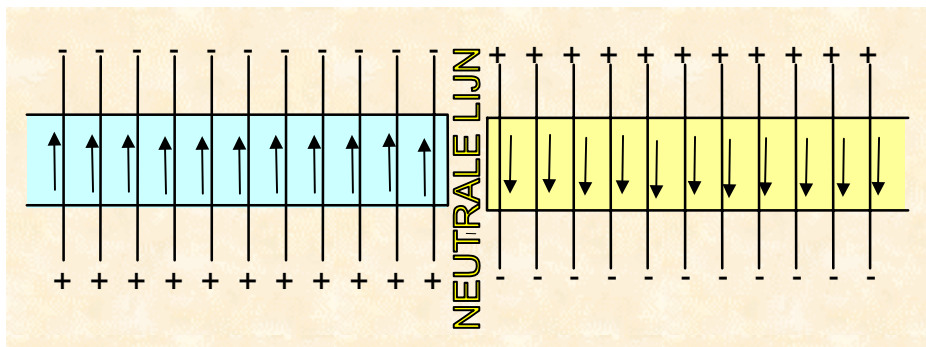
figuur 1.17 *Inductie in de luchtspleet*

In elk van de rotorleiders wordt een spanning geïnduceerd:

$$e_r = B_1 \ell v = B_1 \ell \omega_r r \quad (1.24)$$

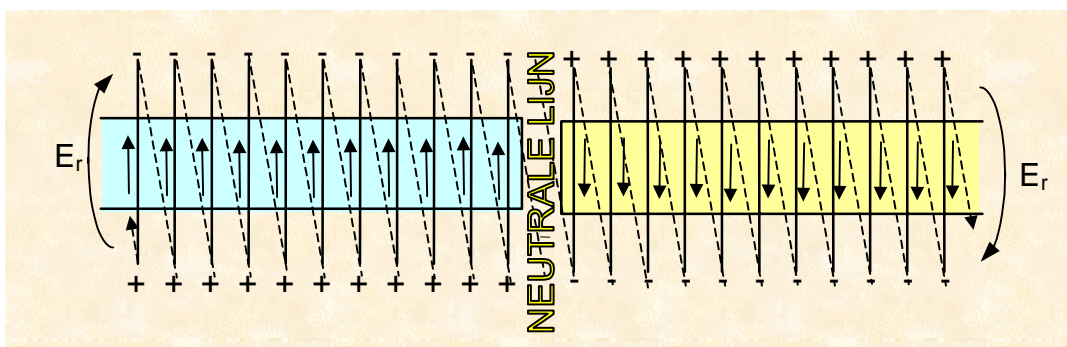
Iedere geleider ziet overeenkomstig zijn plaats op de rotoromtrek een magnetische inductie B_1 (figuur 1.17). Vermits ℓ en v constanten zijn, is deze voorstelling van de verdeling van B_1 tevens een voorstelling van de geïnduceerde spanning e_r in elke geleider als functie van zijn ligging in het veld of als functie van de tijd daar v constant is. De e.m.k. is maximaal als de geleider zich bevindt ter hoogte van de poolmiddellijn aa' en nul in de neutrale lijn bb' . De opgewekte e.m.k. in een geleider is een wisselspanning.

Figuur 1.19 geeft een beeld van de machine op een bepaald ogenblik. Voor de noordpool is de spanningspijl naar achter gericht \otimes ; voor de zuidpool wijst hij naar voor \odot . Als de rotor en zijn geleiders in een vlak ontwikkeld worden, krijgt men het verloop van figuur 1.18.



figuur 1.18 *Lineaire ontwikkeling van de rotorleiders*

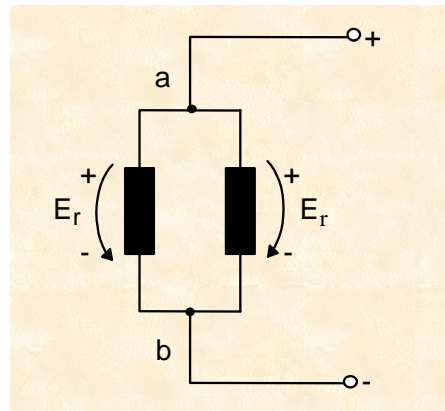
Om de e.m.k.'s op te tellen moeten ze in serie geschakeld worden door verbindingsgeleiders (stippellijnen in figuur 1.19).



figuur 1.19 *Serieschakeling van de opgewekte e.m.k.'s*

In principe mogen alleen die geleiders in serie geschakeld worden die een e.m.k. met hetzelfde teken voortbrengen. In werkelijkheid worden alle geleiders van de rotor in serie verbonden, waarbij de ene helft van de actieve geleiders een e.m.k. met bepaalde richting voortbrengt, de

andere helft van de actieve geleiders een e.m.k. met tegengestelde zin. Men moet als klemmen van de machine de punten a en b nemen (figuur 1.20), waardoor men twee symmetrische takken in parallel bekomt, waarvan de gelijke e.m.k.'s aan elkaar tegengesteld zijn in de inwendige keten van de machine, maar dezelfde zin hebben t.o.v. de uitwendige keten.



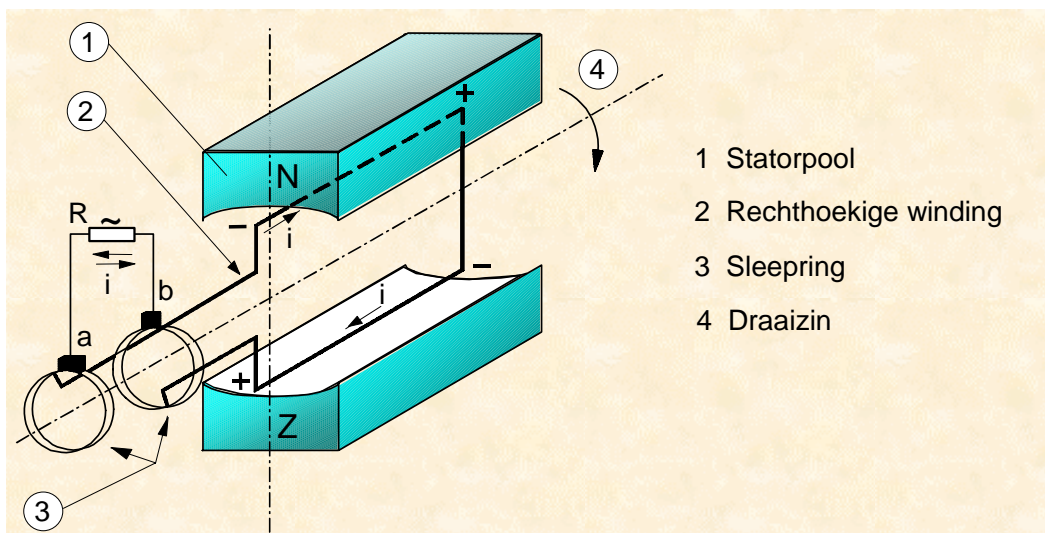
figuur 1.20 *Koppeling van beide machinehelften*

De punten a en b, die de twee groepen met inwendig tegengestelde e.m.k.'s scheiden, zijn vaste punten in de ruimte, terwijl de wikkeling draait in het magnetisch veld. Dit is het probleem van de commutatie.

1.3 Commutatie

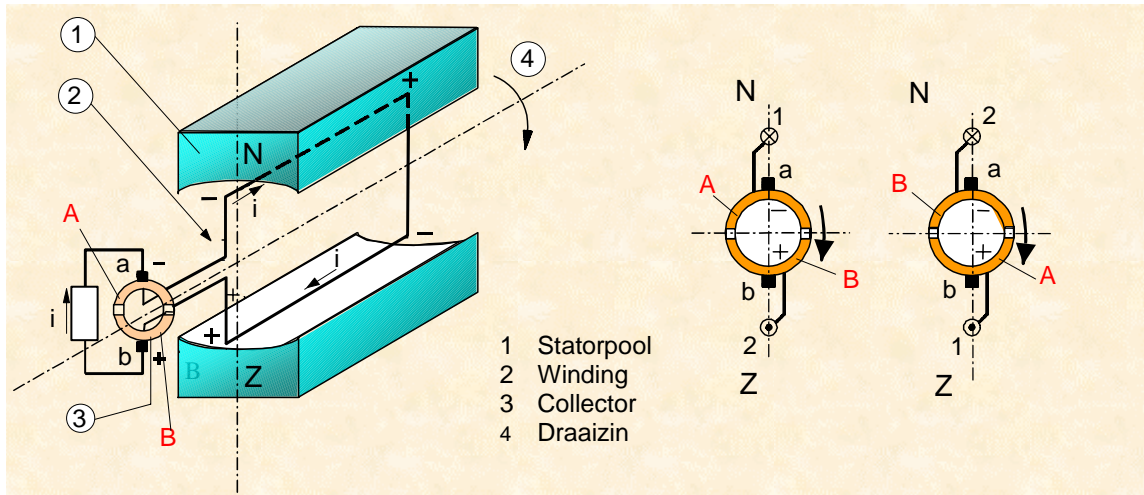
1.3.1 Principe

Beschouw de meest eenvoudige wikkeling bestaande uit twee geleiders (figuur 1.21) die met een uitwendige belasting verbonden zijn door sleepringen en borstels.

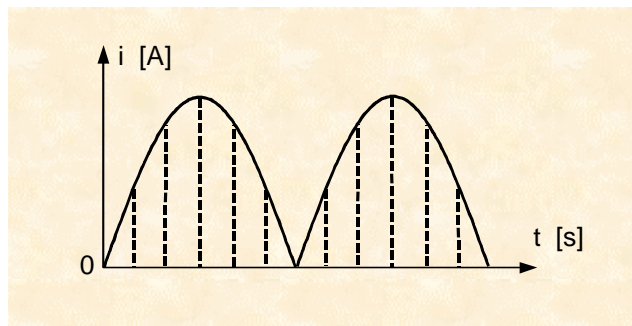


figuur 1.21 *Elementaire wisselstroomgenerator*

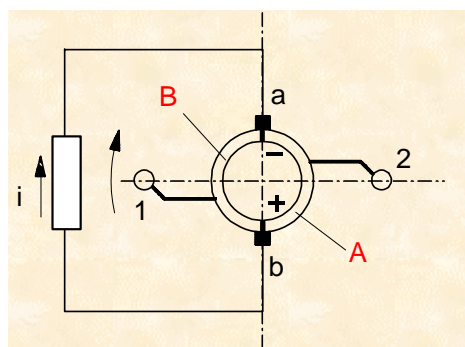
Door de belasting R vloeit een wisselstroom ten gevolge van een wisselspanning aan de borstels a en b . Als de twee sleefringen vervangen worden door twee elektrisch van elkaar geïsoleerde halve cilinders (figuur 1.22) waarop twee borstels a en b (vast in de ruimte) wrijven, dan vloeit door de belasting R een pulserende gelijkstroom (figuur 1.23) ten gevolge van een pulserende gelijkspanning aan de borstels a en b . Figuur 1.27 stelt het commutatie-ogenblik voor: de geleiders 1 en 2 zijn stroomloos en bevinden zich in de neutrale lijn.



figuur 1.22 *Elementaire gelijkstroomgenerator met primitieve commutator*

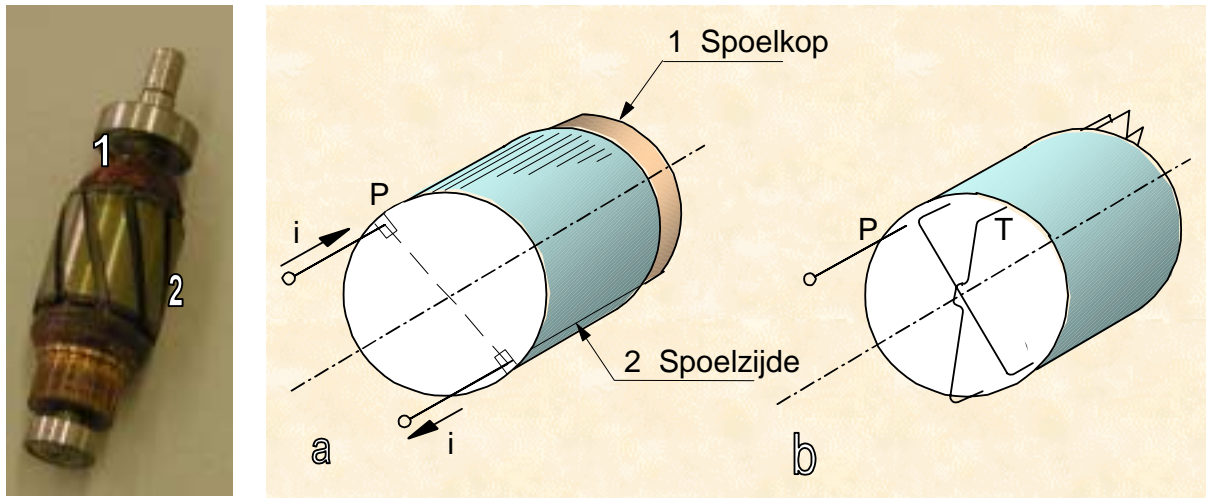


figuur 1.23 *Pulserende gelijkstroom van de elementaire generator*



figuur 1.24 *Commutatie-ogenblik: beide geleiders zijn stroomloos*

De hier voorgestelde commutator is de meest eenvoudige. Praktisch is de commutator, ook collector genoemd, samengesteld uit een groot aantal koperen lamellen die onderling elektrisch geïsoleerd zijn door mica. De zogenaamde luswikkeling bestaat uit een aaneenschakeling van geleiderparen PQ (figuur 1.25a).



figuur 1.25 *Luswikkeling*

Een verbindingsgeleider of spoelkop voert de stroom van geleider P naar geleider Q: de stroom in P is tegengesteld aan deze in Q. Als geleider Q langs de voorzijde verbonden wordt met geleider R, naast P gelegen (figuur 1.25b), en het uiteinde van R met S enz. wordt een luswikkeling bekomen. Zo men deze aaneenschakeling van geleiders verder zet, wordt het gehele cilinderoppervlak bekleed met geleiders. Men verbindt de laatste geleider met P en vormt aldus een gesloten wikkeling. Indien men de wikkeling wil bevestigen in de rotorgleuven, blijkt het moeilijk de voorste en achterste verbindingsgeleiders op een dergelijke manier aan te brengen, tenzij men de actieve geleiders met twee per gleuf bevestigt. De spoelzijde P (= de geleider P) wordt aan de bovenzijde van een gleuf aangebracht, zijn tegenhanger Q op de bodem van een gleuf, diametraal tegenover de gleuf van P.

De poolsteek τ_p wordt gedefinieerd als de afstand tussen twee opeenvolgende poolmiddellijnen behorend bij ongelijknamige polen. Bij een tweepolige machine is:

$$\tau_p = \frac{2\pi}{2} = \pi \quad [\text{rad}] \quad (1.25)$$

of

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{2} = \pi r \quad [\text{m}] \quad (1.26)$$

Voor een 2p-polige machine (p is het aantal poolparen) is:

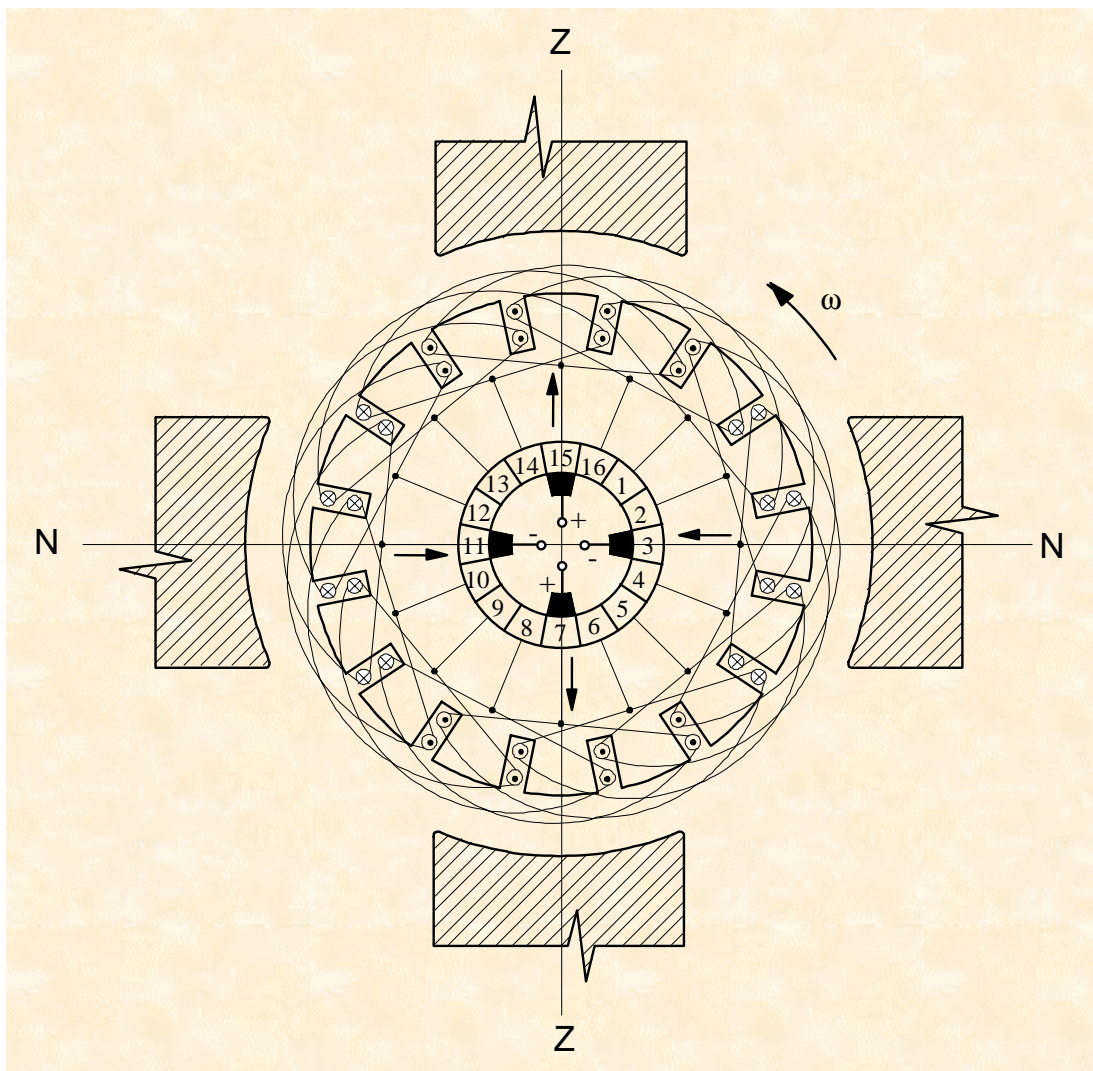
$$\tau_p = \frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p} \quad [\text{rad}] \quad (1.27)$$

of

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad [\text{m}] \quad (1.28)$$

De poolsteek is eveneens de afstand van neutrale lijn tot neutrale lijn.

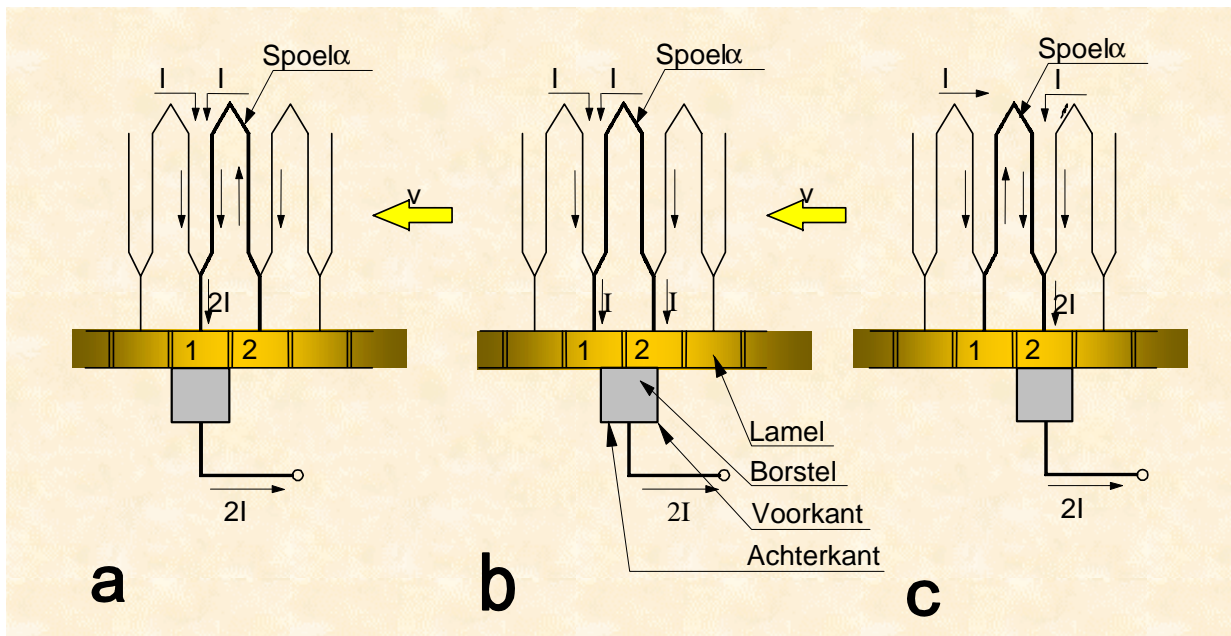
Ten opzichte van de stator, de borstels en de fluxverdeling in de luchtspleet, blijft het stroompatroon stil staan. De verbinding van de actieve geleiders met de collectorlamellen gebeurt zodanig dat de borstels steeds die spoel kortsluiten die op dat ogenblik de neutrale lijn passeert. Dit kan men ook afleiden uit de positie van de borstels in figuur 1.22. De actieve geleiders moeten immers van de ene tak naar de andere worden overgeschakeld op het ogenblik dat ze van pool veranderen, d.w.z. in de neutrale lijn. In figuur 1.26 wordt dit getoond voor een vierpolige machine (4 neutrale lijnen en 4 poolmiddellijnen).



figuur 1.26 *Doorsnede van een vierpolige machine met aanduiding van de luswikkeling en de plaats van de borstels*

1.3.2 Ontleding van het verschijnsel

De tot nu toe besproken commutatie hoort thuis bij de conventionele methode. Dit commutatieproces bedient zich van een stroom die zich een weg zoekt doorheen een glijcontact. Het glijcontact wordt gevormd door een borstel en een verzameling koperlammellen (collector of commutator), die via verbindingsgeleiders verbonden zijn met een paar spoelzijden van de ankerwikkeling. Als de collectorlammellen onder een borstel voorbij komen, wordt de stroom in de spoel, waaraan zij verbonden zijn, omgekeerd. Deze borstel-collector uitrusting is een elektromechanische convertor. Hij functioneert door op mechanische wijze het elektrisch contact tussen de borstel en de collectorlamellen beurtelings te "maken" en te "verbreken". Dit werkingsprincipe beperkt het ontwerp van de machine: het conventioneel commutatieproces vereist immers dat de verhouding rotordiameter tot rotorlengte groot is. Bovendien doen er zich nog tal van andere beperkingen en moeilijkheden voor bij het commuteren. In een geïdealiseerd geval bestaat de ankerwikkeling uit spoelen die elk maar een winding hebben en waarbij de breedte van de borstel gelijk is aan de breedte van een collectorlamel (figuur 1.27).

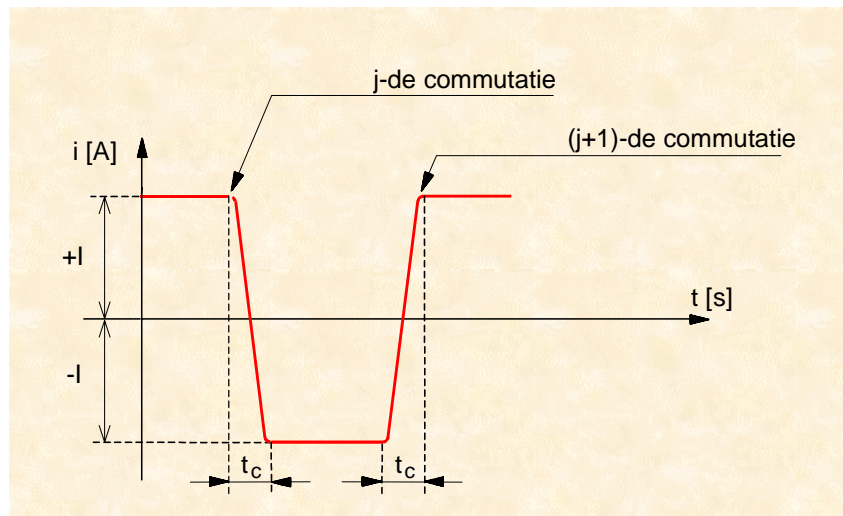


figuur 1.27 *Verloop van de stroom tijdens de commutatie*

Doorheen de borstel vloeit een stroom $I_b = 2I$, waarbij I de stroom door elke parallelle tak voorstelt. In figuur 1.27a raakt de borstel slechts collectorlamel 1. Enkele ogenblikken later (figuur 1.27b) raakt de borstel lamellen 1 en 2, waardoor spoel α kortgesloten wordt. Wanneer de borstel zich helemaal op lamel 2 bevindt, is de stroomverdeling deze van figuur 1.27c. Men ziet dat tijdens de kortsluiting de stroom in de spoel α omkeert, vandaar de benaming commutatie.

Op te merken valt dat de stroom in een spoelzijde constant blijft tussen twee commutaties in, alhoewel de opgewekte e.m.k. in iedere spoelzijde varieert volgens de curve van figuur 1.20. De

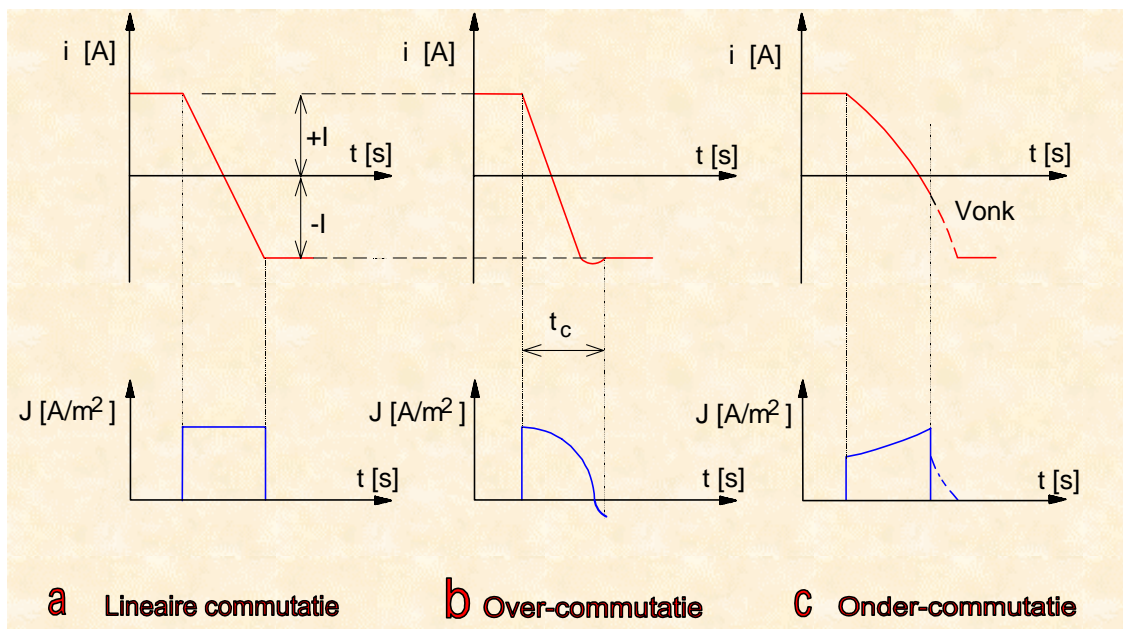
verschillende elementen van een tak kunnen beschouwd worden als in serie geschakelde spanningsbronnen. De stroom wordt bepaald door de totale e.m.k. E_r , en deze laatste is constant. Het verloop van de stroom in een spoelzijde wordt gegeven door figuur 1.28.



figuur 1.28 Verloop van de stroom in een spoelzijde

Het verschijnsel dat bestudeerd wordt, is het omkeren van de stroom tijdens de kortsluiting, d.w.z. gedurende de tijd t_c , commutatieduur.

Als de stroom I_b uniform verdeeld is over de borstel, m.a.w. als de stroomdichtheid J constant is, zijn de stromen door de collectorlamellen evenredig met het contactoppervlak lamelborstel. Dit is de zogenaamde "lineaire commutatie" (figuur 1.29a).



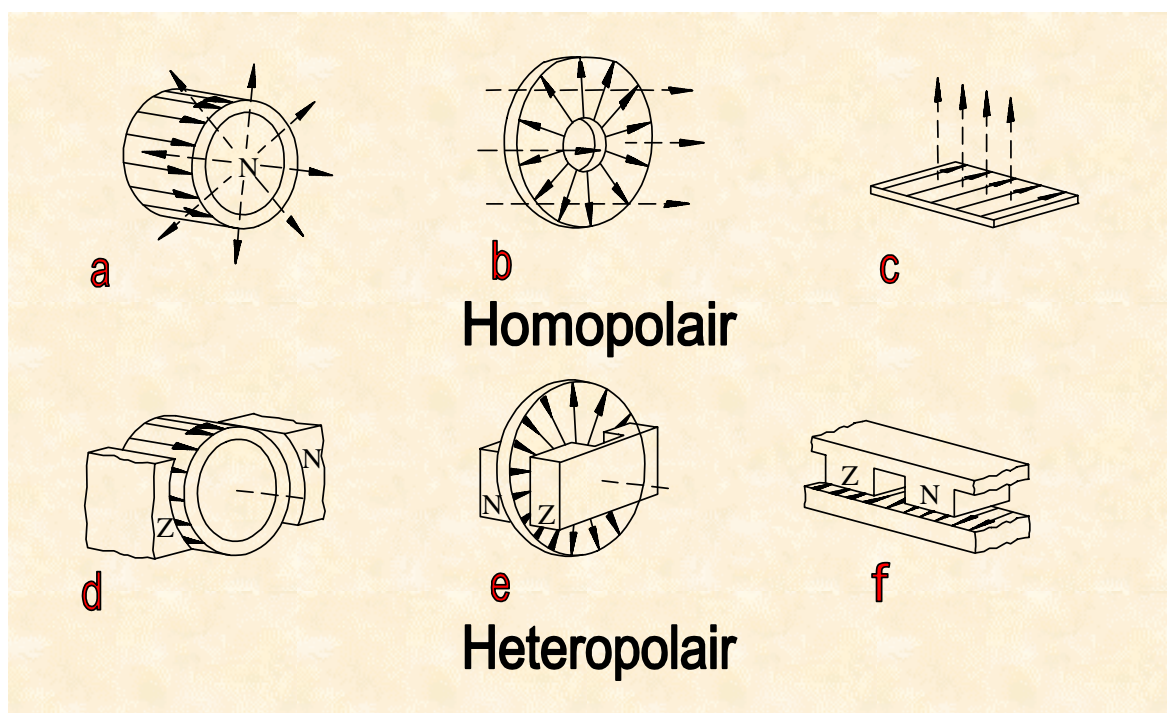
figuur 1.29 Verschillende types stroomverloop bij commutatie

Is aan deze voorwaarde ($J = \text{constant}$) niet voldaan, resulteert dit in "over- of onder-commutatie" (figuur 1.29a en figuur 1.29b). Bij de over-commutatie gebeurt de stroomverandering te vlug, zodat een hoge stroomdichtheid optreedt aan de voorkant van de borstel. De onder-commutatie daarentegen wordt gekenmerkt door het feit dat de stroomomkering nog niet volledig verwezelijkt is, als de collectorlamel de borstel verlaat. De effectieve commutatieduur wordt verlengd door het ontstaan van een vonk. De niet-lineaire commutatievormen geven aanleiding tot hogere Jouleverliezen (I^2R), hogere temperaturen en borstelslijtage. De optredende vonken beschadigen de collector, wat dan weer grotere borstelslijtage tot gevolg heeft en radiostoringen (e.m.c. problemen).

1.4 Praktische uitvoering

De tot nu besproken machines waren uitsluitend van het heteropolaire roterende type. Gezien over de omtrek is de resulterende flux nul. In een homopolaire machine, heeft de flux een werkelijk driedimensionaal verloop. Over de omtrek in de luchtspleet is er een resulterende flux die via de as terugkeert. Algemeen geldt dat een gelijkstroommachine twee onderdelen heeft. Het ene is een elektro- of permanent magneetsysteem dat zorgt voor de opwekking van de magnetische inductie in de luchtspleet. Het andere is een schikking van stroomvoerende geleiders, zodanig georiënteerd of gevormd dat krachtwerking en spanningsopwekking mogelijk zijn.

Het ene onderdeel is de vast geplaatste stator. Het andere is het bewegende lichaam en noemt men de rotor voor een roterende en de looper voor een lineaire machine; vaak wordt ook de term anker gebruikt (figuur 1.30).

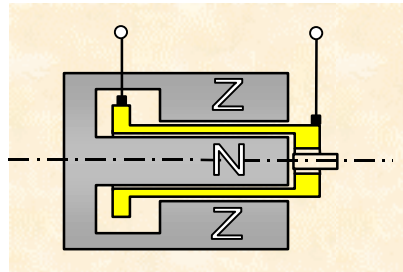


figuur 1.30 *Verskillende types gelijkstroommachines*

De veldlijnen voor de magnetische inductie zijn voorgesteld door streeplijnen, terwijl de ankerstroom in dikke, ononderbroken lijnen getekend is.

1.4.1 Homopolaire machines

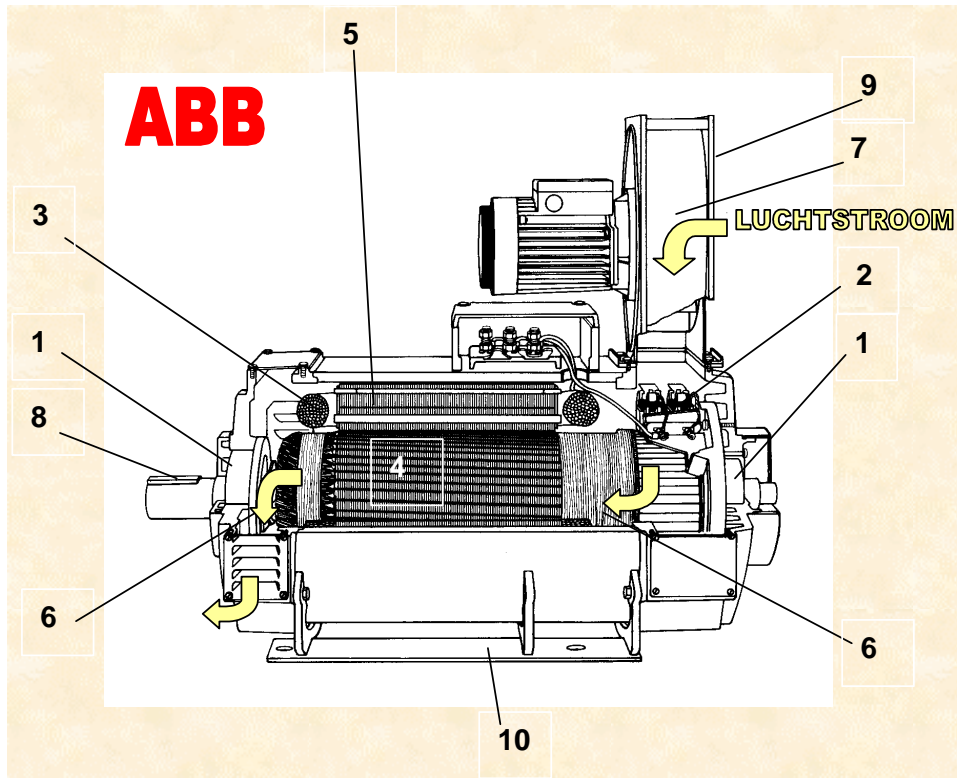
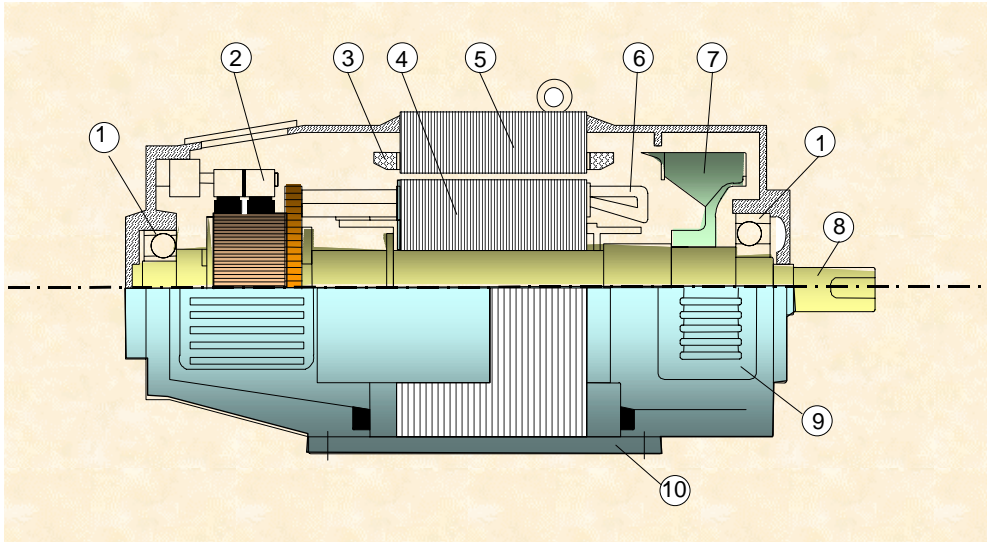
Figuur 1.34a geeft de voorstelling van een homopolaire, cilindrische machine. Figuur 1.35 geeft er eveneens een beeld van. De schijfvormige homopolaire machine is getekend in figuur 1.30b. De schijf bestaat uit een aantal radiaal gerichte geleiders met sleepringen en borstels aan de binnenste en buitenste straal van de schijf. De looper van de lineaire machine (figuur 1.30c) is een samenstelling van afzonderlijke geleiders; hetzelfde principe wordt gebruikt voor erg uiteenlopende toepassingen; een vloeibaar metaal, zoals bij de elektromagnetische pomp, of een geïoniseerd gas (plasma) zoals bij de Magneto-Hydro-Dynamische generator (M.H.D.).



figuur 1.31 *Cilindrische homopolaire gelijkstroommachine*

1.4.2 Heteropolaire machines

Dit zijn de meest voorkomende machines. figuur 1.30 d, e en f tonen de principiële uitvoering. Er is een belangrijk verschil tussen een homopolaire en een heteropolaire machine. In een homopolaire machine is het systeem voor veldopwekking steeds de stator. De sleepring-borstelvoorziening is enkel nodig om de stroom toe te voeren aan en af te tappen van het bewegende anker. In de heteropolaire machine daarentegen is het principieel onverschillig welk lichaam beweegt, het veldopwekkingssysteem of het anker. Men moet er voor zorgen dat de stroom omkeert van richting als een stroomvoerende geleider beweegt van noord- naar zuidpool. Hier treedt dus het commutatatieproces op. Het commuteren is een van de primaire karakteristieken van een heteropolaire gelijkstroommachine en vereist een draaiende wikkeling, tenzij men gebruik maakt van snelle vermogenelektronische schakelaars. In dit laatste geval zorgt een stilstaande vermogenelektronische schakeling voor de stroomomkering. De machine die zo ontstaat noemt men borstelloze gelijkstroommotor. Zij lijkt zeer sterk op een synchrone motor met frequentie-omvormersturing. Daarom wordt zij daar behandeld. De doorsnede van een conventionele, industriële (heteropolaire-cilindrische) machine is getekend in figuur 1.32.



- | | | |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| 1 lager | 4 Ankerblik | 7. Ventilator |
| 2 Borstels | 5. Statorblik | 8. As met spiebaan |
| 3 Veldwikkeling | 6. Ankerwikkeling | 9. Luchtinlaat |
| | | 10. Motorvoet |

figuur 1.32 *Doorsnede van een gelijkstroommachine met de voornaamste onderdelen*